

应用生物完整性指数评价水生生态系统健康的研究进展*

廖静秋 黄 艺**

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘 要 生物完整性指数(ABI)法是评价水生生态系统健康的一种重要且被广泛应用的方法。本文综述了生物完整性指数的指示物种选择原因、构建方法以及在水生生态系统健康评价中的应用,并总结了现阶段生态系统评估常用的鱼类完整性指数(F-ABI)、底栖无脊椎动物完整性指数(B-ABI)和着生藻类完整性指数(P-ABI)中候选生物状况参数指标,提出了使用微生物完整性指数(M-ABI)评价水生生态系统健康的可行性和必要性。

关键词 生物完整性指数 水生生态系统健康 微生物完整性指数

文章编号 1001-9332(2013)01-0295-08 **中图分类号** X171, X826 **文献标识码** A

Research progress on using index of biological integrity to assess aquatic ecosystem health.
LIAO Jing-qiu, HUANG Yi (College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 295-302.

Abstract: Index of biological integrity (ABI) is one of the most important and popular tools in assessing aquatic ecosystem health. This paper reviewed the selection of indicator species for ABI, its construction process, and its applications in assessing aquatic ecosystem health, summarized the commonly used candidate biological parameter indices of fish-index of biological integrity (F-ABI), benthos-index of biological integrity (B-ABI), and periphyton-index of biological integrity (P-ABI), and pointed out the feasibility and necessity of using microbe-index of biological integrity (M-ABI) to assess the health of aquatic ecosystem.

Key words: index of biological integrity (ABI); aquatic ecosystem health; microbe-index of biological integrity (M-ABI).

健康的水生生态系统具有稳定性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力。水生生态系统越健康,就越生机勃勃,充满活力,其从干扰中的恢复能力也就越大。水生生态系统在人类社会的发展过程中发挥着至关重要的作用,它不仅为人类提供生活和生产的基础产品,还具有维持生态系统结构、生态过程和区域生态环境的功能^[1-4]。但近年来,由于人类活动的干扰,水生生态系统功能遭到了严重破坏,并直接导致了河流断流、湿地丧失、区域生态环境退化、生物多样性减少等问题,水生生态系统健康状况受到严重威胁^[2]。因此,水生生态系统健康评价越来越受到国内外学者的关注,

成为了当今生态学中最具活力的一个前沿领域^[5-8]。水生生态系统健康评价是指选取有效的指标和科学的方法,对水生生态系统的健康状况进行准确诊断,进而方便对水生生态系统进行健康管理,实现人和自然生态系统的协调发展^[9]。

当前水生生态系统健康评价主要有2种方法:指标体系法和指示物种法^[1,10-12]。指标体系法是指根据水生生态系统的特征和其服务功能建立指标体系,采用数学方法确定其健康状况;指示物种法是指采用一些指示种群,利用其多样性和丰富度来监测水生生态系统健康^[9]。而在指示物种法中,生物完整性指数(index of biological integrity, ABI)是目前水生生态系统健康评价中应用最广泛的指标之一。本文就生物完整性指数的概念、指示物种选择、ABI构建方法 and 应用情况进行详细的综述,旨在为创建我国水生生态系统健康评估体系提供基本信息。

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-002-006)资助。

** 通讯作者。E-mail: yhuang@pku.edu.cn

2012-03-12 收稿,2012-10-10 接受。

1 生物完整性指数

1.1 概念及涵义

生物完整性指数最早由 Karr 等^[13-14]于 1981 年提出,它由多个生物状况参数组成,通过比较参数值与参考系统的标准值得出该水生态系统的健康程度.生物完整性指数中每个生物状况参数都对一类或几类干扰反应敏感,因此 IBI 可定量描述人类干扰与生物特性之间的关系,间接反映水生态系统健康受到的影响程度.用 IBI 评价水生态系统健康优于用单一指数评价的原因是单一指数反映水生态系统受干扰后的敏感程度及范围不同,综合各个生物状况参数构建 IBI 可以更加准确和完全地反映系统健康状况和受干扰的强度^[14-16].最初 IBI 是以鱼类^[12]为研究对象建立的,随后扩展到底栖无脊椎动物^[6,17-19]、周丛生物^[6,14]、着生藻类^[20]、浮游生物^[7]以及高等维管束植物^[14].

1.2 指示物种的选择

在评价水生态系统健康状况时,根据水生态系统生物群落结构特征和数据可获得情况,选择某类生物群落作为指示物种构建 IBI.国内外 IBI 研究显示,鱼类完整性指数(fish-index of biological integrity, F-IBI)^[15,21-25]和底栖无脊椎动物完整指数(benthos-index of biological integrity, B-IBI)^[2,19,21,26-29]的构建较为成熟,已被广泛应用于水生态与环境基础科学研究、流域管理中;关于着生藻类完整性指数(periphyton-index of biological integrity, P-IBI)^[30-31]的研究起步较晚,但目前也已逐渐展开.学者多选用这 3 种生物作为指示物种的原因在于:

1) 鱼类 鱼类作为指示物种的优点在于,首先是其分布广,能在绝大多数水生态系统中生存,可以反映流域尺度较为全面和详细的水生态系统信息,且其形态特征明显,易于鉴定;其次,大多数鱼类生活史较长,对各方面的压力敏感,当水体特征发生改变时,鱼类个体在形态、生理和行为上会产生相应的反应;再者,鱼类群聚中食性种类较多,彼此之间构成食物网,可反映出系统中消费等级的状况;最后,鱼类群聚中含有众多的功能公位群,可以综合反映水生态系统中各成分之间的相互作用^[32].鱼类作为指示物种的不足在于,具有很强的移动能力,对胁迫的耐受程度比较低,与生态系统变化的相关性比较弱.

2) 底栖无脊椎动物 底栖无脊椎动物作为指示物种的优点在于,首先其在水生态系统中属于消

费者亚系统,以摄食碎屑物为主,包括其中的植物凋落物、藻类和微生物,对物质分解起着重要作用;其次,底栖无脊椎动物一般都有很高的物种多样性,其多样性程度可以间接反映水生态系统功能的完整性;再者,底栖无脊椎动物在水生态系统中的摄食、掘穴和建管等扰动活动会影响系统的物质循环、能量流动过程;最后,底栖无脊椎动物自身作为大多数鸟类饵料的重要组成部分,也可反映系统中消费等级的状况^[2].底栖无脊椎动物作为指示物种的不足在于,无脊椎动物通常分类等级较高,难以测定每个物种的作用,同时这些物种中有些可能不必要甚至不合适.

3) 着生藻类 着生藻类作为生物指示物种的优点在于,首先其为水生态系统的初级生产者,位于食物链的底端,通过光合作用将无机营养元素转化成有机物,并被更高级的有机生命体利用,可以反映系统中消费等级的状况;其次,着生藻类能稳固水底的基质,并为鱼类和底栖动物提供隐蔽所和产卵场;再者,着生藻类分布范围广,并且能够敏感响应水环境状况的变化,尤其是在 N、P 等无机营养盐浓度方面^[33].着生藻类作为生物指示物种的不足在于,该类群的物种数量巨大,且对分类的专业技能要求较高,应用不够广泛.

2 生物完整性指数构建过程

2.1 基本步骤

随着研究的深入,生物完整性指数的构建方法越来越严谨复杂,现阶段 F-IBI、B-IBI 和 P-IBI 的指数构建方法基本一致,其主要步骤包括^[25,28,33]:1) 根据研究区种群特征,在指标库中确定候选生物状况参数指标;2) 选择参考点(未受损样点或受损极小样点)和干扰点(已受各种干扰如点源和非点源污染、森林覆盖率的降低、城镇化、大坝建设等的样点),并采集参数指标数据,通过对参数指标值的分布范围分析、判别能力分析(敏感性分析)和相关关系分析,建立评价指标体系;3) 确定每种参数指标值以及 IBI 指数的计算方法,分别计算参考点和干扰点的 IBI 指数值;4) 建立生物完整性指数的评分标准;5) 通过独立数据的比较,对 IBI 进行验证与修订,确定 IBI 指数方法的有效性.

2.2 候选生物状况参数指标

候选生物状况参数指标对于生物完整性指数的构建至关重要,最初 Karr 等^[13-14]确定的指标体系没有筛选过程,在随后的研究中,一些研究者开始尝试

多指标筛选,针对不同研究区的特点选择不同的候选生物状况参数指标,通过监测目标生物的群落结构特征、生长量、对环境胁迫(变化)的响应等,评价水生态系统的整体状况.选择候选生物状况参数指标时主要考虑:种类数指标的结果在 5 以上,百分比指标各采样点之间差异大于 10%,90%的采样点该指标不为 0,指标尽量涵盖所有指标类型.到目前为止,主要的 IBI 评价参数指标见表 1^[6,21,23-35].

2.3 指数计算方法评价标准

生物完整性指数研究中应用较多的指数计算方法有 1、3、5 赋值法^[15,36-37]、连续赋值法^[37-38]和比值法^[34].有研究根据对河流健康状况的期望不同,选择不同的计算方法^[25].但总体上比值法的使用最多,具有较高的准确度.

评价标准的划分是生物完整性指数评价中的关键,目前还不存在一个统一的划分标准.大多数研究以参照点位 IBI 值分布的 25% 分位数作为健康评价标准^[29],如果点位的 IBI 值>25% 分位数值,则表示该点位受到的干扰很小,是健康的;对<25% 分位数值值的分布范围,进行 3 等分,分别代表一般、较差和极差 3 个健康程度.根据上述方法,可确定出健康、一般、较差和极差 4 个等级的划分标准.该评价标准基本覆盖了水生态系统不同层次的健康状态,划分出的等级数较为合理,可以区分出研究区域所有评价单元水生态系统健康状态之间的差异,但并不是对所有水生态系统都具有适用性.

3 应 用

Karr 等^[13-14]最早以鱼类作为指示生物构建 IBI 对河流健康进行评价,该评价方法已得到许多研究者的认可,并将其应用于其他类型生物,如底栖无脊椎动物,其应用范围很广.着生藻类与鱼类和底栖无脊椎动物相比,在水生态系统健康评价中的作用所引起的重视相对较小,主要原因是该类群的物种数量巨大,且对其分类的专业技能要求较高^[33].国内外有大量的 F-IBI、B-IBI、P-IBI 应用,有的地区甚至使用了多个生物完整性指数进行综合健康评价,例如美国有 26 个州展开了相应的研究工作^[17].每种生物完整性指数的应用情况总结如下.

3.1 F-IBI 的应用

IBI 最初是以鱼类作为研究对象建立起来的,即 F-IBI. F-IBI 最初应用于美国中西部的溪流和河流^[15],如今美国已有 29 个州利用 F-IBI 进行了评价;Oberdorff 和 Hughes^[39]利用 F-IBI 评价法国 Seine

河流域所受到的来自渠道化、农业排放、城镇化以及鲑鱼养殖业对溪流生态系统的影响;在印度, Ganasan 和 Hughes^[37]利用 F-IBI 指数评价受到重金属和有机污染的 Khan 和 Kshipro 河流的健康状况;在日本, Rossano^[40]利用鱼类建立 IBI 指标体系评价大阪溪流生态系统的健康;Steedman^[41]在安大略湖南部溪流研究过程中,根据研究区域内的鱼类组成特点修改了 3 个指标,分别是敏感性鱼类种类、绿太阳鱼的数量、杂交个体百分比;Moyle 和 Randall^[42]在 1997 年对加利福尼亚州内华达山脉流域进行 F-IBI 评价;Shields 等^[43]对密西西比河的温水性支流进行了 F-IBI 评价,认为 IBI 评价结果不能反映该地区生境条件的变化,因为缺少合适的参照点、IBI 分值具有较大的时间差异以及单位努力捕捞量太小等;Breine^[44]对比利时的佛兰德斯地区的溪流进行了鱼类生物完整性评价,结果表明,状况良好的点与受干扰的点和受干扰严重的点之间的 IBI 分值具有明显的差异.

我国利用 F-IBI 体系对水生态系统健康评价鲜见报道,主要的应用有:郑海涛^[32]对怒江鱼类完整性指数进行了初步全面分析;宋智刚等^[23]对太子河水系的鱼类组成进行了调查,利用 IBI 评价方法探讨了太子河水系的健康状况;刘明典等^[24]初步建立了适合长江中上游地区的 F-IBI 指标体系,从长江流域鱼类资源现状出发,评价水域的健康状况,为长江综合开发利用,资源管理决策,以及水环境保护提供理论支持;裴雪姣等^[25]应用 F-IBI 体系对辽河流域的健康进行评价分析,以期为我国河流鱼类完整性评价指标和方法的建立提供参考.

3.2 B-IBI 的应用

底栖无脊椎动物完整性指数(B-IBI)最早在 1994 年由 Kerans 和 Karr^[19]提出,是目前应用最广泛的生物完整性指数.国外关于 B-IBI 的应用情况为:Leonard 和 Orth^[45]对 B-IBI 进行了验证和修订,并在西维吉利亚的小型冷水溪流中运用 IBI 进行评价,同时将 Karr 等^[13-14]提出的指标体系缩减到 7 个;Diaz 等^[35]归纳了 B-IBI 分值与环境质量之间的标准;Weisberg 等^[46]利用 B-IBI 指数评价了 Chesapeake 湾的健康状况;Klemm 等^[47]构建 B-IBI 并评价了大西洋中部高原溪流的健康状况;van Dolah 等^[48]归纳了美国东南部河口 B-IBI 建立的基本过程;Silveira 等^[49]构建 B-IBI 并评价了巴西东南部河流的健康状况;在干旱的墨西哥中西部,B-IBI 被用来评价土地的不同利用方式对溪流生态系统的影

表 1 F-IBI、B-IBI 和 P-IBI 候选生物状况参数指标汇总
Table 1 Summary of candidate biological parameter index of F-IBI, B-IBI and P-IBI

指数 Index	指标类型 Index type	生物参数 Biological parameter
F-IBI	种类组成与丰度 Species composition and abundance	鱼类个体总数 Total fish individuals, 鱼类丰富度 Fish abundance, 香农多样性指数 Shannon diversity index, 土著鱼类生物量 Native fish biomass, 淡水鲈科和杜父鱼科种类数 Freshwater Percidae and Sculpins fish species number, 棘臀科(太阳鱼)种类数 Spines hip (the sun fish) species number, 鲤科棱鱼属种类数 The carp secco edges fish species number, 土著鱼类种类数 Native fish species number, Water-column 鱼类种类数 Water-column fish species number, <i>Centrarchid</i> 种类数 <i>Centrarchid</i> species number, 杜父鱼种类数 Sculpins species number, 亚口鱼科种类数 Catostomidae species number, 象鼻鱼科鱼类种类数 Mormyrid fish species number, 丽鱼科鱼类种类数 Cichlidae fish species number, 洄游性鱼类种类数 Catadromous fish species number, 鲑属鱼类种类数 Salmon fish species number, 大型底栖鲂形目鱼类种类数 Large benthos siluriformes species number, 脂鲤目和鲤形目种类数量 Characiformes and Cypriniformes species number, 鲷科鱼类种类数 Cobitidae fish species number, 鲢科鱼类数量百分比 Salmon fish number percentage, 淡水鲈科鱼类数量百分比 Freshwater percidae fish number percentage, 大麻哈鱼属占鲑科鱼类数量百分比 <i>Oncorhynchus</i> fish number percentage of salmon fish, 土著鲤科小鱼数量百分比 Native cyprinidae fish number percentage, 溪红点鲑数量百分比 Brook trout fish number percentage, 鳟属或欧鲤数量百分比 <i>Oxyconger</i> or carp number percentage, <i>Rhinichthys</i> 种类数量百分比 <i>Rhinichthys</i> fish number percentage, 鲟科鱼类数量百分比 Oryziatidae number percentage, 亲流性鱼类数量百分比 Pro-stream fish number percentage, 生活环境单一的鱼类个体百分比 Individual percentage of fish living in single environment, 鳊科鱼类数量百分比 Bagridae fish number percentage, 雅罗鱼亚科鱼类数量百分比 Leuciscinae fish number percentage, 鲴亚科鱼类数量百分比 Bream subfamily fish number percentage, 鳊亚科鱼类数量百分比 Acheilognathinae fish percentage number, 鮡亚科鱼类数量百分比 Gobioninae fish percentage, 鰕虎鱼科数量百分比 Gobiidae fish percentage, 本地特有鱼种数量百分比 Native fish percentage, 经济鱼类数量百分比 Commercial fish number percentage, 咸淡水类种类数百分比 Appetite water fish number percentage, 商业捕捞获得鱼类科数 Commercial fish family number, 中上层鱼数量百分比 Pelagics fish number percentage, 底层鱼数量百分比 Bottom fish number percentage, 中下层鱼类数量百分比 Middle and lower fish number percentage, 总种类数占期望值百分比 The total number of species accounting for expectations percentage, 土著鲤科小鱼种类数占期望值百分比 Indigenous cyprinid fish species accounted for expectations percentage
	营养结构 Nutrition structure	杂食性鱼类数量百分比 Omnivorous fish number percentage, 昆虫食性鱼类数量百分比 Insect feeding fish number percentage, 顶级鱼食性鱼类数量百分比 Top fish feeding fish number percentage, 昆虫食性鲤科鱼类数量百分比 Insect diet cyprinids number percentage, 草食性鱼类数量百分比 Herbivorous fish number percentage, 非鱼食性鱼类数量百分比 Non-fish feeding fish number percentage, 肉食性鱼类数量百分比 Carnivorous fish number percentage, 鱼食性鱼类生物量百分比 Fish feeding fish biomass percentage, 鱼食性鱼类数量百分比 Fish feeding fish number percentage, 鱼食性鱼类种类数占期望值百分比 Fish feeding fish number accounted for expectations percentage, 底栖动物食性鱼类数量百分比 Benthic animals feeding fish number percentage
	健康状况 Health condition	单位努力捕捞量 Per unit of effort catches, 不同网目网具获得鱼类数量平均值 Fish population average using different mesh, 体长组成 Length component, 河鲈年龄结构 River trout age structure, 鲑属鱼类或狗鱼年龄结构 Salmon fish or pike fish age structure, 杂交个体数量百分比 Hybrid individuals number percentage, 入侵种数量百分比 Invasive species number percentage, 疾病、肿瘤、鳍损伤或其他形体异常个体百分比 Diseases, tumors, fin damage, or other physical abnormalities individual number percentage, 受到生存压力的土著鱼类个体数百分比 Indigenous fish facing surviving pressure individual number percentage, 冷水鱼类数量百分比 Cold water fish number percentage, 广布种鱼类数量百分比 Widespread species fish number percentage
	繁殖共位群 Breeding group	产漂浮性卵鱼类数量百分比 Production buoyancy egg fish number percentage, 产沉性卵鱼类数量百分比 Production sinking egg fish number percentage, 产粘性卵鱼类数量百分比 Production viscous egg fish number percentage, 产卵方式特殊的鱼类数量百分比 Fish spawning in a special way number percentage, 筑巢护卵行为鱼类数量百分比 Nest protecting eggs behavior fish number percentage
B-IBI	耐受性 Tolerability	敏感性鱼类数量百分比 Sensitive fish number percentage, 耐受性鱼类数量百分比 Tolerated fish number percentage
	物种丰富度 Species abundance	香农多样性指数 Shannon diversity index, 辛普森多样性指数 Simpson diversity index, 丰富度指数 Abundance index, 均匀度指数 Evenness index, 总密度 Total density, 总生物量 Total biomass, 总分类单元数 Total taxa, 蜉蝣目分类单元数 Ephemeroptera taxa number, 翅目分类单元数 Homoptera taxa number, 毛翅目分类单元数 Trichoptera taxa number, 鞘翅目分类单元数 Coleoptera taxa number, 蜻蜓目分类单元数 Odonata taxa number, 双翅目分类单元数 Diptera taxa number, ETO 分类单元数 ETO taxa number, EPT 分类单元数 EPT taxa number, (甲壳动物+软体动物)分类单元数 (Crustacean+molluscs) taxa number, 摇蚊分类单元数 Chironomid taxa number, 直突摇蚊亚科分类单元数 Direct conflict chironomid subfamily taxa number, 长跗摇蚊族分类单元数 Long tarsal chironomidae taxa number, 水生昆虫分类单元数 Aquatic insects taxa number, 纹石蛾科丰富度 Plessite moth richness, 襀翅目丰富度 Plecoptera richness, 毛翅目丰富度 Trichoptera richness, 长跗摇蚊族丰富度 Long tarsal chironomidae richness, (甲壳动物+软体动物)丰富度 (Crustacean+molluscs) richness, 蜉蝣目丰富度 Ephemeroptera richness, EPT 丰富度 EPT richness, EPT-纹石蛾科丰富度 EPT-Plessite moth richness, 无生物样点比例 Sample points percentage with no organism

续表 1
Table 1 Continued

指数 Index	指标类型 Index type	生物参数 Biological parameter
	种类组成 Species composition	个体数量 Individuals number, 分类单元数 Taxa number, 优势单元数量百分比 Dominant taxa number percentage, 前两位优势单元数量百分比 First two dominant taxa number percentage, 前三位优势单元数量百分比 First three dominant taxa number percentage, 前五位优势单元数量百分比 First five dominant taxa number percentage, 蚋科/双翅目 Simuliidae / Diptera, 纹石蛾科/毛翅目 Plessite moth / Trichoptera, 扁蜉科/蜉蝣目 Heptageniidae/ Ephemeroptera, 小蜉科/蜉蝣目 Ephemerellidae / Ephemeroptera, 摇蚊科/双翅目 Chironomidae / Diptera, 四节蜉科/蜉蝣目 Baetidae / Ephemeroptera, 大蚊科/双翅目 Tipulidae/ Diptera, 扁泥甲科/鞘翅目 Psephenidae/ Coleoptera, 长角泥甲科/鞘翅目 Elmidae/ Coleoptera, EPT/摇蚊数量 EPT/ Chironomidae number, EPT/ (EPT 数量+ 摇蚊数量) EPT/(EPT number+ Chironomidae number, Florida 指数 Florida index, 甲壳动物数量百分比 Crustaceans number percentage, (甲壳动物+软体动物) 数量百分比 (Crustacean+mollusc) number percentage, 软体动物数量百分比 Mollusc number percentage, 寡毛类动物数量百分比 Oligochaetes number percentage, (寡毛类动物+蛭纲) 数量百分比 (Oligochaeta+ Hirudinea) number percentage, 多毛类动物数量百分比 Polychaeta number percentage, 棘皮动物数量百分比 Echinoderm number percentage, 蛭纲动物数量百分比 Hirudinea number percentage, 端足类数量百分比 Amphipoda number percentage, 腹足纲数量百分比 Gastropoda number percentage, 斧足纲数量百分比 Pelecypoda number percentage, 无足类群数量百分比 Enough groups number percentage, 非昆虫类数量百分比 Non-insects number percentage, 无分节附肢动物数量百分比 No stanza appendage animals number percentage, 蜉蝣目数量百分比 Ephemeroptera number percentage, 翅目数量百分比 Homoptera number percentage, 毛翅目数量百分比 Trichoptera number percentage, 双翅目数量百分比 Diptera number percentage, 襖翅目数量百分比 Plecoptera number percentage, 鞘翅目数量百分比 Coleoptera number percentage, 广翅目数量百分比 Wide Homoptera number percentage, 蜻蜓目数量百分比 Odonata number percentage, 等足目数量百分比 Isopoda number percentage, 颤蚓数量百分比 Flutter earthworm number percentage, 摇蚊数量百分比 Chironomid number percentage, 纹石蛾科数量百分比 Plessite moth number percentage, EPT 纹石蛾科数量百分比 EPT Plessite moth number percentage, 跗摇蚊族数量百分比 Tarsal chironomidae number percentage, 环足摇蚊属数量百分比 Central foot Chironomid genus number percentage, Orthoclase 数百分比 Orthoclase number percentafe,甲壳动物分类单元数百分比 Crustacean taxa number percentage, 软体动物分类单元数百分比 Molluscs taxa number percentage, (甲壳动物+软体动物) 分类单元数百分比 (Crustacean+molluscs) taxa number percentage, 双翅目分类单元数百分比 Diptera taxa number percentage, 广翅目分类单元数百分比 Wide Homoptera taxa number percentage, 毛翅目分类单元数百分比 Trichoptera taxa number percentage, 摇蚊分类单元数百分比 Chironomid taxa number percentage, 蚋科分类单元数百分比 Simuliidae taxa number percentage, 环足摇蚊属分类数百分比 Central foot Chironomid genus taxa number percentage, 寡毛类动物生物量百分比 Oligochaetes biomass percentage, 多毛类动物生物量百分比 Polychaetes biomass percentage, 软体动物生物量百分比 Molluscs biomass percentage, 棘皮动物生物量百分比 Echinoderms biomass percentage, 蛭纲生物量百分比 Hirudinea biomass percentage
	营养结构 Nutrition structure	杂食动物数量百分比 Omnivore number percentage, 杂食动物分类单元数 Omnivore taxa number, 捕食者分类单元数 Predator taxa number, 集食者分类单元数 Set predator taxa number, 撕食者分类单元数 Shredder taxa number, 滤食者分类单元数 Filter feeders taxa number, 刮食者分类单元数 Scraper taxa number, 捕食者数量百分比 Predator number percentage, 撕食者数量百分比 Shredder number percentage, 集食者数量百分比 Set predator number percentage, 滤食者数量百分比 Filter feeders number percentage, 刮食者数量百分比 Scraper number percentage, Pteronarcys 数量百分比 Pteronarcys number percentage, 捕食者分类单元数百分比 Predator taxa number percentage, 撕食者分类单元数百分比 Shredder taxa number percentage, 集食者分类单元数百分比 Set predator taxa number percentage, 滤食者分类单元数百分比 Filter feeders taxa number percentage, 刮食者分类单元数百分比 Scraper taxa number percentage, 刮食者/滤食者 Scraper/Filter feeders, 刮食者/ (集食者+滤食者) Scraper/(Set predator+Filter feeders)
	生物耐受性 Tolerability	敏感类群 (PTV<4) 分类单元数 Sensitive groups (PTV<4) taxa number, 耐污类群 (PTV≥6) 分类单元数 Tolerance groups (PTV≥6) taxa number, 超耐污类群 (PTV≥8) 分类单元数 Ultra-tolerance groups (PTV≥8) taxa numbe, 兼性类群 (4≤PTV<6) 分类单元数 Facultative groups (4≤PTV<6) taxa number, 敏感类群数量百分比 Sensitive groups number percentage, 耐污类群数量百分比 Tolerance groups number percentage, 超耐污类群数量百分比 Ultra-tolerance groups number percentage, 兼性类群数量百分比 Facultative groups number percentage, 敏感类群分类单元数百分比 Sensitive groups taxa number percentage, 耐污类群分类单元数百分比 Tolerance groups taxa number percentage, 超耐污类群分类单元数百分比 Ultra-tolerance groups taxa number percentage, 兼性类群分类单元数百分比 Facultative groups taxa number percentage, BI 指数值 BI index, EPT-非耐污性蜉蝣目丰富度 EPT-Non-tolerance Ephemeroptera richness, 非耐污种群丰富度 Non-tolerance group richness
	小生境质量 Habitat quality	黏附者数量所占比例 Adhesion number percentage
P-IBI		富营养化指数 Eutrophication index, 着生藻类密度 Periphyton density, 物种丰富度 Species richness, 物种优势度 Species dominance, 生物量指数 Biomass index, 绿藻属总数 Total number of green algae genus, 叶绿素指数 Chlorophyll index, 碱性磷酸酶活性指数 Alkaline phosphatase activity index, 藻类分类单元数 Periphyton taxa number, 非硅藻类丰富度 Non-diatom abundance, 叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content, 硅藻多度 Diatom degree, 藻类细胞多度 Periphyton cells degree, 敏感性藻类百分比 Sensitive periphyton percentage, 菱形藻百分比 Nitzschia percentage, 颤藻百分比 Oscillatoria percentage, 硅藻百分比 Diatoms percentage, 蓝藻百分比 Cyanobacteria percentage, 优势硅藻百分比 Dominant diatom percentage, 可运动硅藻百分比 Kinetic diatom percentage, 具柄硅藻百分比 Stipitate diatoms percentage, Acidophilic 占硅藻数百分比 Acidophilic accounting for diatom percentage, Eutraphentic 占硅藻数百分比 Eutraphentic accounting for diatom percentage, A. minutissima 占硅藻数百分比 A. minutissima accounting for diatom percentage, 氮异养硅藻占硅藻数百分比 Nitrogen heterotrophic diatom accounting for diatom percentage, 硅藻分类单元数百分比 Diatom taxa percentage, 蓝藻分类单元数百分比 Cyanobacteria taxa percentage

响^[50];在日本,Rossano^[40]利用 B-IBI 指标体系评价大阪溪流生态系统的健康;20 世纪 90 年代初,韩国研究耐污值,开始采用底栖动物类群的耐污生物指数评价水质^[51];Lydy 等^[52]对小阿肯萨斯河盆地(LARB)的 IBI 研究结果显示,研究区域的生物完整性呈现整体下降的趋势;目前,美国有 48 个州展开了 B-IBI 评价水质工作,并且由于区域的差异性,不同的州构建的 B-IBI 指标体系都不相同^[17]。

我国在 B-IBI 研究方面起步较晚,杨莲芳等^[53]于 1992 利用 EPT 分类单元数和科级水平生物指数(FBI)评价了安徽九华河的水质状况;王备新等^[26]以安徽黄山地区的溪流为对象,首次对 B-IBI 指标体系构建进行研究,由于我国区域之间的底栖动物区系差异较大,其结果仅适用于长江中下游地区的溪流;李强等^[54]通过熵值权重系数计算 B-IBI 值并对西苕溪的健康状况进行评价,研究表明 B-IBI 指数与栖境指数、水温 and 海拔显著相关;蔡立哲^[55]分别以深圳湾福田潮间带、厦门港潮下带和集美凤林红树林为对象,对 B-IBI 指数和评价标准进行了研究;张远等^[31]以辽河流域河流为对象,对 B-IBI 指标体系与评价标准进行研究,为我国北方地区的河流生态系统完整性评价指标和方法的建立提供了依据;曹艳霞等^[29]建立了适合漓江水系健康评价的 B-IBI,虽然研究结果离实际应用有较大差距,但还是反映了漓江流域的健康状况。

3.3 P-IBI 的应用

利用藻类进行生物完整性研究的报道较少,P-IBI 的应用刚刚起步。Stevenson^[56]1998 年以硅藻类作为溪流和湿地风险管理规划的参考,运用 IBI 方法进行研究,其指标体系仅有种类数量、多样性等 5 个指标;Hill 等^[31]在 Mid-Appalachian 流域采集了不同年份 233 个支流样点的藻类数据,构建了由 10 个指标组成的 P-IBI 指数,发现流域低地和高地的 P-IBI 差异较大,并分析了 P-IBI 与一些化学指标的相关性;目前,美国仅有 4 个州利用了藻类进行水质生物评价。

国内的相关研究主要集中在长江流域的香溪河和冈曲河^[57-59];殷旭旺等^[28]调查了辽宁省浑河水系着生藻类的群落结构特征,并在此基础上评价了浑河水系着生藻类的生物完整性。

综上,经过各国 30 多年的研究,IBI 的研究在理论基础和评价方法上都得到了显著发展,已被广泛应用于水生生态科学研究、资源管理、环境工程评价、政策和法律的制订,也被许多环保组织采用。水生态

系统的任何变化都会影响水生生物的生理功能、种类丰度、种群密度、群落结构等,因此,生物完整性指数既能深刻揭示水生态系统的健康状况、水生态系统结构,反映生态系统功能,又能评估人类活动的影响程度。因此,IBI 法是评价水生态系统健康状况的重要手段。一些评价案例真实地反映出被评价系统的生态质量状况,证明了这套方法是评价水生态系统健康状况的有效工具之一。

4 研究展望

经过各国专家多年研究,生物完整性指数构建在理论基础和技术方法上都日渐成熟。越来越多的研究者采用 IBI 指数评价水生态系统的健康状况,广泛的应用体现出方法的可行性。但是,由于水生态系统结构的复杂性和功能的丰富性,使得 IBI 指数无论是在理论上还是在构建方法上,仍然存在一些问题,需要进行更加深入的研究:

1) 没有完整的候选生物状况参数指标数据库。作为一个具有广阔水域的国家,需要根据地理和水文特征,建立我国水生态系统完整性评价的指导性参数指标数据库,为评价各水域的水生态系统健康提供基础平台。

2) 候选生物状况参数指标的筛选不够成熟。大多数研究者没有在构建 IBI 时明确指出选择这些候选指标的原因,选择指标受到人类主观因素影响过大。

3) 评价标准的制定应更科学。可综合多个案例制定出适合某一特定类型水生态系统的统一标准,便于在同一标准下考量不同地区类似水生态系统的健康状况,使其具有可比性。

4) P-IBI 的指标太少,应用不多。已有的候选指标并不能满足对自然条件各异的水生态系统健康评价的需求,应开发更多合理的候选指标,使 P-IBI 评价方法更加有效。

5) 完整的水生态系统生物群落由生产者、消费者和分解者共同构成,现有的 IBI 只关注了生产者和消费者,忽略了分解者。水生态系统中的分解者,是水体自我净化的基础,其结构特征和功能状态反应了水生态系统对污染输入胁迫的恢复力。同时,随着水污染日益严重,生产者和消费者生物群落多样性日益减少,数据可获得性难度增加,以分解者——微生物群落为对象构建 IBI (microbe-index of biological integrity, M-IBI),将成为必须的选择。Carlisle 和 Clements^[60]用试验证明了微生物群落的丰富度对水

生态系统的干扰非常敏感; Kondratieff 等^[61]通过在美国弗吉尼亚州长达一年的研究也发现,微生物群落会明显受到污水以及工业活动的影响,在参考点微生物以自养型为主,而在干扰点异养型微生物明显增加。由于微生物种类繁多且采集及鉴定技术有限,即使采用分子生物学技术进行其群落特征分析,由于现存数据库中信息较少的限制,使得利用 M-IBI 评价水生态系统健康存在一定困难。现阶段国内外并没有对 M-IBI 展开系统研究, M-IBI 的构建还有待时日,但寻找能够完整反映水生态系统健康状态和变化趋势的、新的指示物种,必然是一个重要的研究方向。

参考文献

- [1] Luo Y-C (罗跃初), Zhou Z-X (周忠轩), Sun Y (孙轶), *et al.* Assessment methods of watershed ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23** (8): 1606-1622 (in Chinese)
- [2] Dai J-C (戴纪翠), Ni J-R (倪晋仁). Analysis of benthic animal's effect on aquatic ecosystem health assessment. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(6): 2107-2111 (in Chinese)
- [3] Deng H-B (邓红兵), Wang Q-L (王庆礼), Cai Q-H (蔡庆华). Watershed ecology—New discipline, new idea and new approach. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9** (4): 443-449 (in Chinese)
- [4] Wu J-G (邬建国). Dissipative structure, hierarchy theory and ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1991, **2**(2): 181-186 (in Chinese)
- [5] Ma K-M (马克明), Kong H-M (孔红梅), Guan W-B (关文彬), *et al.* Ecosystem health assessment: Methods and directions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(12): 2107-2116 (in Chinese)
- [6] Kong H-M (孔红梅), Zhao J-Z (赵景柱), Ji L-Z (姬兰柱), *et al.* Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(4): 486-490 (in Chinese)
- [7] Griffith MB, Hill BH, McCormick FH. Comparative application of indices of biotic integrity based on periphyton, macroinvertebrates, and fish to southern Rocky Mountain streams. *Ecological Indicators*, 2005, **5**: 117-136
- [8] Eugene AS, Oh IH. Aquatic ecosystem assessment using exergy. *Ecological Indicators*, 2004, **4**: 189-198
- [9] Zhang G-S (张光生), Xie F (谢锋), Liang X-H (梁小虎). Indicators and methods for assessing aquatic ecosystem health. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(24): 334-337 (in Chinese)
- [10] Hui X-J (惠秀娟), Yang T (杨涛), Li F-Y (李法云), *et al.* Health assessment on aquatic ecosystem in Liaohu River of Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22** (1): 181-188 (in Chinese)
- [11] Wu E-N (吴阿娜), Yang K (杨凯), Che Y (车越), *et al.* Representation and assessment of river health. *Advanced in Water Science* (水科学进展), 2005, **16**(4): 602-604 (in Chinese)
- [12] Morley SA, Karr JR. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin. *Conservation Biology*, 2002, **16**: 1498-1509
- [13] Karr JR, Dudley DR. Ecological perspective on water quality goals. *National Wetlands Newsletter*, 1996, **18**: 10-16
- [14] Karr JR. Ecological integrity and ecological health are not the same// Schulze P, ed. *Engineering within Ecological Constraints*. Washington DC: National Academy Press, 1995: 97-109
- [15] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**: 21-27
- [16] Karr JR. Defining and assessing ecological integrity: Beyond water quality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, **12**: 1521-1531
- [17] Karr JR, Chu EW. Sustaining living rivers. *Hydrobiologia*, 2000, **422/423**: 1-14
- [18] Karr JR, Rossano EM. Applying public health lessons to protect river health. *Ecology and Civil Engineering*, 2001, **4**: 3-18
- [19] Kerans BL, Karr JR. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications*, 1994, **4**: 768-785
- [20] Jungwirth M, Muhar S, Schmutz S. Assessing the ecological integrity of running waters, proceedings of the international conference. *Hydrobiologia*, 2000, **422/423**: 245-256
- [21] Barbour MT, Gerritsen JG, Griffith E, *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**: 185-211
- [22] Chun K, Weaver MJ, Deegan LA. Assessment of fish communities in New England embayments: Application of the estuarine biotic integrity index. *Biological Bulletin*, 1996, **191**: 320-321
- [23] Song Z-G (宋智刚), Wang W (王伟), Jiang Z-Q (姜志强), *et al.* Preliminary research using F-IBI to assess aquatic ecosystem health of Taizi River Basin. *Journal of Dalian Ocean University* (大连海洋大学学报), 2010, **12**(6): 480-491 (in Chinese)
- [24] Liu M-D (刘明典), Chen D-Q (陈大庆), Duan X-B (段辛斌), *et al.* Using biotic integrity index of fish to assess health of Yangtze River middle-upper stream. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (长江科学院院报), 2010, **27**(2): 1-9 (in Chinese)
- [25] Pei X-J (裴雪姣), Niu C-J (牛翠娟), Gao X (高欣), *et al.* The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30** (21): 5736-5746 (in Chinese)
- [26] Wang B-X (王备新), Yang L-F (杨莲芳), Hu B-J (胡本进), *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using benthic-index of biotic integrity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(6): 1481-1494 (in Chinese)
- [27] Cao Y-X (曹艳霞), Zhang J (张杰), Cai D-S (蔡德所). Lijiang River health assessment using a benthos index of biotic integrity for invertebrate. *Water Resources Protection* (水资源保护), 2010, **26**(2): 13-19 (in Chinese)
- [28] Zhou X-W (周晓蔚), Wang L-P (王丽萍), Zhang B-H (郑丙辉), *et al.* Estuary health assessment using a benthic index of biotic integrity in Yangtze Estuary and its adjacent waters. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(1): 242-248 (in Chinese)
- [29] Zhang Y (张远), Xu C-B (徐成斌), Ma X-P (马溪平), *et al.* Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(6): 919-930 (in Chinese)
- [30] Hill BH, Herlihy AT, Kaufmann PR, *et al.* Assessment

- of streams of the eastern United States using periphyton index of biotic integrity. *Ecological Indicators*, 2003, **2**: 325–338
- [31] Hill BH, Herlihy AT, Kaufmann PR, *et al.* Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, **19**: 50–67
- [32] Zheng H-T (郑海涛). Fish-Index of Biotic Integrity Assessment of Nu River Middle-Upper Stream. Master Thesis. Wuhan: Huangzhong Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [33] Yin X-W (殷旭旺), Zhang Y (张 远), Qu X-D (渠晓东), *et al.* Community structure and biological integrity of periphyton in Hunhe River water system of Liaoning Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2011, **22** (10): 2732–2740 (in Chinese)
- [34] Blocksom KA, Kurtenbach JP, Klemm DJ, *et al.* Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, **77**: 311–333
- [35] Diaz RJ, Cutter GR Jr., Dauer DM. A comparison of two methods for estimating the status of benthic habitat quality in the Virginia Chesapeake Bay. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, **285**: 371–381
- [36] Karr JR, Fausch KD, Angermeier PL, *et al.* Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale. *Illinois Natural History Survey Specific Publication*, 1986, **5**: 1–28
- [37] Ganasan V, Hughes RM. Application of an index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the rivers Khan and Kshipra (Madhya Pradesh), India. *Freshwater Biology*, 1998, **40**: 367–383
- [38] Minns CK, Randall RG, Cairns VW, *et al.* An index of biotic integrity (IBI) for fish assemblages in the littoral zone of Great Lakes' Areas of Concern. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, **51**: 1804–1822
- [39] Oberdorff T, Hughes RM. Modification of an index of biotic integrity based on fish assemblage to characterize rivers of the Seine Basin, France. *Hydrobiologia*, 1992, **228**: 117–130
- [40] Rossano EM. Development of An Index of Biotic Integrity for Japanese Streams (IBI-J). Master Thesis. Seattle, Washington: University of Washington, 1995
- [41] Steedman RJ. Modification and assessment of all index of biotic integrity to quantify stream quality in Southern Ontario, Canada. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1988, **45**: 492–501
- [42] Moyle PB, Randall PJ. Evaluating the biotic integrity of watersheds in the Sierra Nevada. *Conservation Biology*, 1998, **12**: 1318–1326
- [43] Shields FD, Knight SS, Cooper CM. Use of the index of biotic integrity to assess physical habitat degradation in warm water streams. *Hydrobiologia*, 1995, **312**: 191–208
- [44] Breine J. A fish-based index of biotic integrity for up-stream brooks in Flanders (Belgium). *Hydrobiologia*, 2004, **522**: 133–148
- [45] Leonard PM, Orth DJ. Application and testing of an index of biotic integrity in small, coolwater streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1986, **115**: 401–414
- [46] Weisberg SB, Ranasinghe JA, Schaffner LC, *et al.* An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay. *Estuaries*, 1997, **20**: 149–158
- [47] Klemm DJ, Blocksom KA, Fulk FA. Development and evaluation of a macroinvertebrate biotic integrity index (MBII) for regionally assessing Mid-Atlantic Highlands streams. *Environmental Management*, 2003, **31**: 656–670
- [48] van Dolah RF, Hyland JL, Holland AF, *et al.* A benthic index of biological integrity for assessing habitat quality in estuaries of the southeastern USA. *Marine Environmental Research*, 1999, **48**: 269–283
- [49] Silveira MP, Baptista DF, Buss DF, *et al.* Application of biological measures for stream integrity assessment in south-east Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, **101**: 117–128
- [50] Weigel BM, Henne LJ, Martinez-Rivera LM. Macroinvertebrate-based index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico. *Journal of the North American Benthological Society*, 2002, **21**: 686–700
- [51] Yoon I, Bossano EM, Kong DS, *et al.* Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates—Saprobic valency and indicative value. *Korean Journal of Environmental Biology*, 1992, **10**: 24–39
- [52] Lydy MJ, Strong AJ, Simon TP. Development of an index of biotic integrity for the Little Arkansas River Basin, Kansas. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**: 523–530
- [53] Yang L-F (杨莲芳), Li Y-W (李佑文), Qi D-G (戚道光), *et al.* Insect community structure and biologic assessment of water quality of Jihua River. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 1992, **12** (1): 8–15 (in Chinese)
- [54] Li Q (李 强), Yang L-F (杨莲芳), Wu Q (吴 璩), *et al.* Stream health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Xitaoxi Stream, Zhejiang Province, China. *Environmental Science (环境科学)*, 2007, **28** (9): 2141–2147 (in Chinese)
- [55] Cai L-Z (蔡立哲). Progress on marine benthic ecology and biodiversity. *Journal of Xiamen University (厦门大学学报)*, 2006, **45** (2): 83–89 (in Chinese)
- [56] Stevenson RJ. Diatom indicators of stream and wetland stressors in a risk management framework. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, **51**: 107–118
- [57] Tang T, Cai QH, Liu JK. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **112**: 347–361
- [58] Jia X-H (贾兴焕), Wu N-C (吴乃成), Tang T (唐涛), *et al.* Spatio-temporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19** (4): 881–886 (in Chinese)
- [59] Wu NC, Tang T, Qu XD, *et al.* Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**: 37–49
- [60] Carlisle DM, Clements WH. Sensitivity and variability of metrics used in biological assessments of running waters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, **18**: 285–291
- [61] Kondratieff PF, Matthews RA, Buikema AL. A stressed stream ecosystem: Macroinvertebrate community integrity and microbial trophic response. *Hydrobiologia*, 1984, **111**: 81–91

作者简介 廖静秋,女,1989年生,硕士研究生。主要从事水环境控制与环境生物技术研究,发表论文1篇。E-mail: celia123g@sina.com

责任编辑 肖 红